

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 7 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2017

課題番号：25800143

研究課題名(和文) 弦理論、ゲージ重力対応を核とした、物性、原子核、重力理論の未解決問題への挑戦

研究課題名(英文) Solving Condensed Matter, Nuclear and Gravity Problems via String and Gauge/Gravity Duality

研究代表者

飯塚 則裕 (Iizuka, Norihiro)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：40645462

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の概要は主に以下である。1. 3次元重力理論の分配関数の計算をある仮定の下で厳密に行う事に成功した。2. ゲージ重力対応を用い、超流動現象に対応する新しい重力解を発見しそこからランダウの超流動方程式を重力理論から再導出した。3. 2次元ゲージ理論でエンタングルメントエントロピーを、「拡張された」ヒルベルト空間の定義を用いて計算し、ゲージ理論のエンタングルメントエントロピーの直感的理解を得た。4. 量子情報理論に基づく議論を用いて、ブラックホールの蒸発にともない放出される粒子間には非常に小さいがゼロではない相関があることを見出し、そこから時空の局所性の破れに対する考察を行った。

研究成果の概要(英文)：Our main achievements are as followings: 1. We obtained the quantum gravity partition function for 3D pure gravity by conducting the path integral exactly under some assumption. 2. Using gauge/gravity correspondence, we found new novel gravitational solutions which are gravitational dual to the persistent superconductor currents along the direction with no translational symmetry. 3. We calculated the entanglement entropy in 1+1-dimensional SU(N) gauge theories with various matter fields using the lattice regularization and extended Hilbert space definition for entanglement entropy. We clarify the physical interpretation of all of the contributions for the entanglement entropy. 4. We compute the mutual information of two Hawking particles emitted consecutively by an evaporating black hole. We find that the mutual information is exponentially small but nonzero and we speculate on implications for black hole unitarity, in particular on a possible failure of locality at large distances.

研究分野：弦理論

キーワード：ゲージ重力対応 弦理論 量子重力

1. 研究開始当初の背景

弦理論の非摂動定義としてのゲージ重力対応 (AdS/CFT 対応) が発見されてから 10 数年経ち、ゲージ理論と重力理論 (弦理論) の基礎的な対応関係のみならず、さらにその対応を発展させ、量子色力学 (QCD) や原子核理論、物性理論への応用がさかんに研究され始めている状況であった。また同時に、これらの研究から逆に (量子) 重力理論への理解を深めようという機運が高まっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は様々な理論で、ゲージ重力対応の応用的側面の研究を推し進めることで、物性理論等について、重力側からという新たな視点から得、その理解を深めること。同時に、ゲージ重力対応を利用して、重力理論を重力を含まないゲージ場の理論から考えることで、(量子) 重力理論そのものについて新たな知見を得ることであった。

3. 研究の方法

(1) 弦理論で開発された新しい計算手法(ゲージ重力対応)は一方 (重力理論) を用いて、他方 (ゲージ場の理論) の強相関、強結合状態の物理量を解析的に計算し、その背後にある新しい物理的描像を重力側の知見で “再” 発見することを可能にする。この研究を推し進めるには具体的に、ゲージ理論の物理に対応した現象を、ゲージ重力対応を用いて重力側の境界条件等に焼き直し、新たな重力理論の解を構成することが必要である。これを具体的に推進することで、重力理論についての理解を深める。

(2) ゲージ理論の経路積分をより深く探ることで、対応する量子重力の経路積分に対してあらたな知見を洞察する。特に 3 次元 (空間 2 次元+時間 1 次元) 量子重力は局所的自由度がないことから厳密計算を可能にする可能性が高く、これを厳密に解く事は現実の 4 次元の量子重力を理解するための試金石であることから、特に 3 次元重力に着目して、計算を試みる。

4. 研究成果

(1) 我々は、3 次元重力理論が少なくとも古典的には 3 次元チャーンサイモンズ理論と等価である事、および 3 次元チャーンサイモンズ理論が量子論的には局所化という手法を用いる事によって厳密に経路積分を行って量子論的に解く事が可能である事を利用して、3 次元重力理論の分配関数の計算をある仮定の下で厳密に行う事に成功した。得られた分配関数は双対な 2 次元境界場の理論の真空およびプライマリーオペレーターの

キャラクターで表す事ができ、特殊なセントラルチャージの場合、Witten が予言した J 関数に一致する事が確かめられた。

(2) さらに(1)の計算手法を 3 次元でスピンの 3 以上の場を含む高スピン重力理論に拡張し、その場合でも分配関数を求める事に成功した。その分配関数は、双対な境界場の理論の W_N 対称性の表現になっており、その係数は非負の整数になっているなど整合性も確かめた。

(3) 3 次元 AdS 時空超重力理論(SUGRA)において局所化の方法を用いて経路積分を行うために、3 次元超重力理論における高階微分項 (R^2 , $(R_{\mu\nu})^2$) が超対称 Exact 項として記述されるかについて調べた。結果、超対称性の off-shell 形式において、 R^2 , $(R_{\mu\nu})^2$ などの高階微分項は、超対称 Exact 項としては書けない事が解った。その理由としては、余剰項として、必ず cosmological constant スケールの質量項が付随するためである事がった。

(4) ゲージ重力対応を詳しく調べる事によって超流動現象に対応する新しい重力解を発見した。驚くべきことに、その解は周りの時空は回転しているが、そのなかにあるブラックホール自体は回転していない。これはブラックホールの剛性定理からくる帰結である。この解の特性を詳しく調べる事によって、ランダウの超流動の方程式を我々の新しい重力解から再導出した。

(5) 超弦理論を非摂動的に定義する一つの候補として BFSS 行列模型がある。この模型の時間発展を詳しく調べる事により、対応する 10 次元時空で、ブラックホールが生成される数値的証拠を行列模型の観点から得ることに成功した。

(6) 我々 2 次元でゲージ群 $SU(N)$ をもち、fundamental 表現の物質場を含んだゲージ理論でのエンタングルメントエントロピーを、「拡張された」ヒルベルト空間の定義を用いて計算した。結果、エンタングルメントエントロピーには 3 つの寄与を含むこと、およびそれぞれの直感的な理解が可能になった。3 つの寄与とは、1. 「superselection sector の分配に伴う Shannon entropy による寄与」 2. 「meson が color singlet をつくるため、それに付随したエンタングルメントによる寄与」 3. 「真に Bell pair 状態の相関による寄与」の 3 つである。さらに transfer matrix formalism を用い、物質場の質量の逆展開で、真空のエンタングルメントに上述の 1. 2. 3. がどのように寄与しているのか計算した。結果、真の Bell pair 状態の寄与は 1. 2. の寄与より、より高次展開で生じることが明らかになり、ここから、連続極限での真空のエンタングルメントの考察を行った。

(7) ブラックホールの蒸発に伴い放出される粒子間には一般的には相関がないというのがホーキングの予言である。しかしブラックホールの蒸発がユニタリーであるならば、それらの粒子間には非常に小さいかもしれないがゼロでない相関があるはずである。我々は Page の量子情報論に基づく議論を利用して、それらの粒子間に存在する相関の量を計算した。その大きさは $\exp(-S)$ (ここで S はブラックホールのエントロピー) と非常に小さいがゼロではない。我々はこの非常に小さい量が、いかに時空の局所性を非常に小さい効果として破り、蒸発をユニタリーにしているかについて考察した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 14 件、すべて査読あり)

① S. Aoki, N. Iizuka, K. Tamaoka, T. Yokoya, “Entanglement Entropy for 2D Gauge Theories with Matters”, Phys. Rev. D96 (2017) 045020, DOI: 10.1103/PhysRevD.96.045020

② M. Honda, N. Iizuka, A. Tanaka, S. Terashima, “Exact Path Integral for 3D Higher Spin Gravity”, Phys. Rev. D95 (2017) 046016, DOI: 10.1103/PhysRevD.95.046016

③ N. Iizuka, A. Tanaka, S. Terashima, “Exact Path Integral for 3D Quantum Gravity”, Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 161304, DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.161304

④ S. Aoki, M. Hanada, N. Iizuka, “Quantum Black Hole Formation in the BFSS Matrix Model”, JHEP 1507 (2015) 029, DOI: 10.1007/JHEP07(2015)029

⑤ N. Iizuka, A. Ishibashi, K. Maeda “Persistent Superconductor Currents in Holographic Lattices”, Phys. Rev. Lett. 113 (2014) 011601, DOI: 10.1103/PhysRevLett.113.011601

⑥ N. Iizuka, D. Kabat, “Mutual Information in Hawking Radiation”, Phys. Rev. D88 (2013) 084010, DOI: 10.1103/PhysRevD.88.084010

[学会発表] (計 10 件)

① Norihiro Iizuka, “Some thoughts on complexity”, Holography, Quantum Entanglement and Higher Spin Gravity II, (招待講演) 2018年3月14日～16日、京都大学基礎物理学研究所

② Norihiro Iizuka, “Exact Path Integral for 3D Quantum Gravity”, Joburg Workshop on String Theory, (招待講演) 2017年12月18日～22日、南アフリカ Wits Rural Facility

③ Norihiro Iizuka, “Exact Path Integral for 3D Quantum Gravity”, Quantum Matter, Spacetime and Information, (招待講演) 2016年6月13日～17日、京都大学基礎物理学研究所

④ Norihiro Iizuka, “What does condensed matter physics tell us about general relativity?”, International Workshop on “Developments in M-theory, (招待講演) 2015年1月12日～16日、韓国 High 1 Resort

⑤ Norihiro Iizuka, “Holography and black holes in condensed matter”, Workshop on Strong Dynamics Beyond QCD from Lattice and String Theory, (招待講演) 2014年12月8日～10日、台湾 National Chiao-Tung University

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

飯塚 則裕 (Iizuka Norihiro)

大阪大学・理学研究科・助教

研究者番号：40645462

(2)研究分担者

()

研究者番号：

(3)連携研究者

()

研究者番号：

(4)研究協力者

()